

## Отзыв

официального оппонента д-ра техн. наук Тимофеева Анатолия Николаевича на диссертационную работу Орлова Максима Андреевича на тему: «Разработка технологии создания элементов газотурбинного двигателя из полимерных композиционных материалов с применением автоматизированной нашивки ровингом», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 – «Порошковая металлургия и композиционные материалы»

Развитие двигателестроения напрямую связано с созданием новых материалов. Так, внедрение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в газотурбинных двигателях (ГТД) позволит по сравнению с металлическими аналогами снизить массу деталей на 40-60 %, а себестоимость изготовления деталей на 20-40%. При этом мировые тенденции говорят о увеличении доли ПКМ в ГТД к 2025 году почти в три раза по сравнению с нынешним уровнем. Поэтому уже только в этой части представленная работа является актуальной и своевременной. В настоящее время уровень разработок в области отечественных ПКМ отстает от ведущих зарубежных стран. И причина не только в качественных высокопрочных углеродных наполнителях, но и сложившемся отставание в области технологий получения объемных преформ для ПКМ, ибо традиционные слоистые углепластики не могут обеспечить современный уровень требований конструкторов газотурбинных двигателей. В этой связи, разработка отечественных технологий получения преформ с 3-Д армированием является важнейшей государственной задачей, решение которой позволит обеспечить создание необходимых композиционных материалов для перспективных авиационных двигателей.

Таким образом, актуальность диссертационной работы Орлова Максима Андреевича, направленной на разработку новой технологии создания объемно-армированных полимерных композиционных материалов с применением метода автоматизированной нашивки углеродного волокна на водорастворимую подложку для сложнопрофильных, высокопрочных элементов газотурбинного двигателя с повышенными эксплуатационными характеристиками, не вызывает сомнений

Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы. Рассмотрим содержание работы по главам.

**Первая глава** соответствует своему назначению: проведен анализ научно-технической информации по применения композиционных материалов в двигателестроении, существующих способов и современных тенденций изготовления деталей, узлов и сборочных единиц газотурбинного двигателя из

ПКМ, выявлены их основные преимущества и недостатки. Автором критически рассмотрен метод ручной выкладки (стр. 13-14) в части трудоемкости и длительности процесса. Однако, для большей объективности оценки предложенного автором метода, было бы целесообразно рассмотреть методы автоматического раскроя, автоматической прошивки сухих тканых пакетов автоматической выкладки препрегов, а также иглопробивную технологию формирования преформ. Это позволило бы более объективно оценить возможности предлагаемого автором способа, так как фраза автора «Мировой опыт применения TFP-технологии дает возможность назвать её самой перспективной среди других методов создания объёмно-армированных преформ» (стр. 29) является весьма субъективным, тем более что ранее автор убедительно доказывал преимущества и других способов объёмно-армированных преформ.

Вместе с тем, автором, конечно, абсолютно правильно сделано утверждение о перспективах рынка, востребованности данной технологии. Предложено применение вымываемой водой подложки, что позволит без травмирования отделять ее от преформ.

Таким образом, анализ современного состояния научных и технических подходов по теме работы позволил автору обосновать и сформулировать задачи диссертации и еще раз подтвердить актуальность темы.

**Во второй главе** приведены основные методы исследования и использованные материалы, включая методы изготовления образцов и методики проведения экспериментов.

В качестве волокнистых наполнителей при изготовлении преформ автоматизированной нашивкой были выбраны углеродные волокна HTS 45 12K, IMS 65 24K (TohoTenax®, Япония) и арамидное волокно Русар-С (ООО НПП «Термотекс», г. Мытищи, Россия). К сожалению, автором не представлено обоснование, почему выбраны волокна именно этих марок, при этом для определения физико-механических характеристик материала использовались углеродные волокна HTS 45 12K, а при изготовлении лопатки применено углеродное волокно IMS-65. Безусловно украсило бы работу и сравнение свойств с ПКМ на основе углеродных волокон российской компании «UMATEX». Описывая процесс изготовления преформ методом выкладки слоев ткани (стр. 33) автором не указана марка ткани и обоснование ее выбора.

**Третья глава** посвящена определению эффективности метода нашивки в сравнении с методом ручной выкладки (с прошивкой и без) и оценке технологичности предлагаемого решения.

Автором показано, что по определяемым показателям (облой, отклонение массы и размеров преформ от номинальных значений, трудоемкость) опытные образцы преформ, изготовленных по разрабатываемой технологии с

применением автоматизированной нашивки углеродного волокна, превосходят образцы, изготовленные с применением ручной выкладки. Вместе с тем, следует отметить, что утверждение об отсутствии отклонений от заданных размеров преформ, полученных методом нашивки, является весьма спорным. Правильнее было бы говорить об отсутствии отклонений в рамках заданных допусков.

**Четвертая глава** посвящена исследованию физико-механических свойств образцов углепластиков на основе преформ, изготовленных с разными технологическими параметрами режимов нашивки. Результаты испытаний показали, что свойства нашивных материалов сопоставимы со свойствами прессованных углепластиков, при этом ПКМ на основе TFR-преформ обладают более высокой прочностью на сдвиг (до 30%) по сравнению с прессованными, что крайне важно для сохранения целостности конечного изделия, не давая ему даже в случае режимов эксплуатации, близких к разрушению, распадаться на осколки. Это связано с наличием арамидных нитей в армирующей структуре, препятствующих движению и развитию трещин. В данной главе автор указывает плотность нашивки то в у.е, то в мм, что усложняет восприятие текста работы.

Главным результатом работы, представленным в данном разделе, является определение предпочтительных параметров процесса нашивки преформ, что безусловно является первым шагом к оптимизации параметров данного способа. Но даже эти результаты исследований позволили разработать автору рациональные технологические режимы, что обеспечило превосходство по ряду характеристик над прессованными композитами.

**В пятой главе** представлены модели расчета физико-механических свойств материалов, получаемых методом автоматизированной нашивки ровинга, а также результаты исследования напряженно-деформированного состояния слоистого материала с учетом его взаимодействия с подложкой при послонной нашивке ровинга.

На основании проведенных аналитических исследований и расчетов, автором установлен ряд крайне важных зависимостей, знание которых необходимо при проектировании и изготовлении новых деталей и конструкций из ПКМ. В том числе показано, что расчет физико-механических и теплофизических свойств материалов, получаемых методом автоматизированной нашивки ровинга, можно производить с использованием относительно простого правила смеси, что крайне важно на первом этапе разработки нового композиционного материала. Хотелось бы пожелать автору в своих будущих научных трудах избегать некорректного термина армирующему наполнителю - «арматура».

Результаты испытаний рабочего колеса центробежного компрессора, элементы

которого были изготовлены из материала по разработанной технологии, представленные в **шестой главе**, убедительно подтвердили правильность выбранного автором направления и его перспективность.

Установлено, что при рабочей максимальной частоте 52000 об/мин рабочего колеса центробежного компрессора из созданного ПКМ для ГТД не превышает уровень предельных деформаций. К сожалению, не представлен акт испытаний ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», а его наличие, безусловно, украсило бы работу.

Таким образом, автором убедительно доказано, что применение композиционных материалов, полученных с применением автоматизированной нашивки ровингом, обеспечит надежную работоспособность ряда элементов перспективного газотурбинного двигателя.

Отмеченные выше результаты являются существенным вкладом в развитие представлений о возможностях получения полимерных композиционных материалов и, несомненно, заслуживает высокой оценки.

Критерию – **научная новизна** отвечает ряд положений, из которых наиболее значимыми являются следующие:

- определены зависимости свойств преформ и углепластика от параметров нашивки. Показано, что при плотности нашивки 50-60 у.е. с шагом 7-10 мм наблюдается существенное увеличение характеристик углепластика, по сравнению с прессованными композиционными полимерными изделиями;
- разработана математическая модель для расчета нормальных и касательных напряжений слоистого полимерного материала, позволяющая определять распределение напряжений в подложке, контактном слое и по толщине композита.

**Практическая ценность** диссертационной работы Орлова М.А. не вызывает сомнений и заключается в разработке технологической схемы изготовления объёмно-армированных преформ лопаток ГТД из ПКМ с применением автоматизированной нашивки ровингом, исключая влияние человеческого фактора на качество изделия. Результаты работ используются в НИР и ОКР, а также в опытном производстве Межотраслевого инжинирингового центра «Композиты России» МГТУ им. Н.Э. Баумана, что подтверждено соответствующим актом.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**, сформулированных в диссертации, подтверждена широким использованием научных работ отечественных и зарубежных авторов по теории и практике получения композиционных материалов и их применения как в авиационном двигателестроении, так и в других отраслях экономики. Высокий уровень объективности и адекватности выводов подтверждается использованием в работе последних публикаций в периодических изданиях по исследуемой

тематике. Диссертационная работа содержит необходимые ссылки на литературные источники.

**Достоверность** полученных результатов подтверждена многочисленными экспериментами, методами исследования с применением современного технологического и аналитического оборудования, корректностью разработанных математических моделей и их адекватностью, согласованностью полученных теоретических данных с экспериментальными.

В порядке критических замечаний, вопросов и рекомендаций следует отметить следующее:

1. В главе 2.1 в качестве использованных материалов приведено углеродное волокно HTS 45 12K, а разделе 2.2 в качестве материала преформ лопаток компрессора рабочего колеса использовалось уже углеродное волокно IMS-65, в главе 4 (таблица 17) добавлено углеродное волокно T700. Чем обусловлено применение разных по физико-механическим характеристикам углеродных наполнителей?

2. Чем обусловлено изменение схем армирования для изготовления образцов? Так, на странице 33 указано, что схемы армирования  $[0^{\circ}, +45^{\circ}, 90^{\circ}, -45^{\circ}]$  были выбраны для всех преформ и сравнения результатов, а на странице 35 указано, что по предполагаемой технологии схема армирования выбрана  $[0^{\circ}, 90^{\circ}]$ .

3. Не во всех таблицах и графиках, к сожалению, указаны доверительные интервалы или разброс данных, учитывая, что в некоторых случаях изменение величин составляет около 10%.

4. На странице 78 в главе 5 считается, что углеродные волокна в модели могут быть как изотропными, так и трансверсально-изотропными. Однако, в дальнейшем во всех приведенных зависимостях волокно считается изотропным. Известно, что углеродные волокна обладают высокой степенью анизотропии, но в работе не приведена информация - насколько используемое допущение влияет на точность приведенных моделей.

5. Работа автором позиционируется в большей степени, как технологическая. Но при этом должного внимания не уделено конструкторской или технологической документации.

Указанные выше замечания не снижают общего положительного впечатления от диссертационной работы, не снижают научную и практическую значимость проведенных исследований и не влияют на главные теоретические и практические результаты диссертации. Основные выводы не вызывают сомнений, главная цель работы достигнута. Полученные результаты прошли апробацию на научно-технических конференциях, в том числе международных,

изложены автором в 35 научных работах, из них 18 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Автореферат и опубликованные статьи полностью отражают основное содержание диссертационной работы М.А. Орлова.

Результаты могут быть использованы в университетах, исследовательских институтах, занятых изучением аналогичных проблем.

В целом, представленная к защите диссертационная работа «Разработка технологии создания элементов газотурбинного двигателя из полимерных композиционных материалов с применением автоматизированной нашивки ровингом» по экспериментальному, методическому и теоретическому уровню, объему работы, научной новизне, актуальности, теоретической и практической значимости полностью отвечает требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, и критериям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013г. №842 (ред. от 01.10.2018, с изм. от 26.05.2020), а её автор Орлов Максим Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 - «Порошковая металлургия и композиционные материалы».

Официальный оппонент  
Доктор технических наук  
(Специальность 05.17.06 –  
Технология и переработка  
полимеров и композитов),  
Первый заместитель  
генерального директора  
Акционерного Общества  
«Композит».



А.Н. Тимофеев